



**Universidad
de Valparaíso**
CHILE

Facultad de Ingeniería

INGENIERIA CIVIL OCEÁNICA

**CONSIDERACIONES SOBRE LAS VARIACIONES DE
MEDIANO Y LARGO PLAZO DEL OLEAJE EN EL
DISEÑO DE OBRAS MARÍTIMAS EN CHILE
CENTRAL
DOC ICO 01-2012**

Publicado en la Revista Chilena de Ingeniería, N°464 –
Anales del Instituto de Ingenieros de Chile, Vol. 123 N°3 –
Diciembre de 2011

CONSIDERACIONES SOBRE LAS VARIACIONES DE MEDIANO Y LARGO PLAZO DEL OLAJE EN EL DISEÑO DE OBRAS MARÍTIMAS EN CHILE CENTRAL.

Mauricio Molina P¹, Manuel Contreras L², Patricio Winckler G¹,
Sergio Salinas M³, y Mauricio Reyes G¹

RESUMEN

En la práctica actual del diseño de obras marítimas, el oleaje es supuesto como un proceso estacionario, es decir, los parámetros estadísticos derivados de un registro histórico se mantienen en el tiempo y son utilizados para estimar el oleaje de diseño durante la vida útil de la obra. Evidencias de fenómenos no estacionarios, como El Niño o el Calentamiento Global, actuando sobre el mecanismo de generación de las olas: los patrones de viento, sugieren que el oleaje debe ser considerado también como no estacionario.

En este trabajo se propone la búsqueda de una metodología que incorpore las influencias del fenómeno El Niño y el Calentamiento Global en los estudios de clima medio de oleaje, para obtener pronósticos con mayor certidumbre. Los resultados sugieren la presencia de variaciones debidas a estos fenómenos, en los promedios y desviaciones estándar mensuales de los parámetros de altura significativa, período peak y dirección peak en la estadística de 20 años de parámetros de resumen en 4 puntos de la costa central de Chile, en las latitudes 31°S, 35°S, 37°S y 39°S (desde la IV a la XIV región, exceptuando la V).

Nota: Este trabajo forma parte de los resultados de la tesis de para optar al título de Ingeniero Civil Oceánico del primer autor, que profundizan una investigación sobre los efectos del cambio climático sobre las costas de Chile (Winckler *et al.*, 2009) que formó parte del estudio “La Economía del Cambio Climático sobre las Costas de Chile” (CEPAL, 2009). Se amplía la discusión y se contextualizan los resultados en relación a las problemáticas vinculadas al diseño de obras marítimas costeras.

¹ Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Valparaíso <mauricio.molina@uv.cl>

² Centro de Estudios Avanzados y Departamento Ciencias de la Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de Playa Ancha <manuel.contreras@upla.cl>

³ Escuela de Ciencias del Mar, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso <ssalinas@ucv.cl>

1. Introducción.

Las obras marítimas suelen tener tiempos de vida proyectada del orden de décadas. En su diseño se deben caracterizar los agentes físicos durante la vida útil, entre los cuales el oleaje constituye el agente fundamental, sobre todo en aquellas obras costeras expuestas al Océano Pacífico. La caracterización del oleaje requiere del estudio de los fenómenos de transformación costera, de interacción con las obras y sus potenciales efectos en fenómenos de erosión y embancamiento.

En la práctica nacional, las metodologías actuales de cálculo del oleaje suponen un proceso estacionario, que permite proyectar el oleaje en una localidad en base a registros históricos o metodologías de reconstrucción indirecta del oleaje a partir de información de vientos, presión atmosférica y altimetría satelital (SHOA, 2011; Hanson *et al*, 2006). Hasta ahora, los estudios se han limitado a analizar variaciones longitudinales y estacionales, (Acuña & Monárdez, 2007) sin considerar las variaciones climáticas futuras. Este supuesto parece cuestionable pues fenómenos no estacionarios, como El Niño o el Calentamiento Global, podrían generar modificaciones en el patrón de generación de oleaje y por tanto en los parámetros de diseño de las obras marítimas.

El objetivo de este trabajo es proponer una metodología de cálculo no estacionario de los parámetros de diseño del oleaje, bajo los escenarios de cambio climático (IPCC, 2007) y otros fenómenos de escala global como El Niño – Oscilación Sur, en adelante ENOS (Maturana *et al*, 2004). Esta metodología considera que las series de tiempo de los parámetros de oleaje sufren modificaciones en su media, desviación estándar o covarianza para diferentes intervalos de tiempo (Parzen, 1999).

Las principales zonas de generación de oleaje se encuentran en torno a los 60° de latitud del hemisferio norte y sur, donde se presentan vientos que en términos medios van de Oeste a Este (Fuenzalida, 1983). El oleaje generado en estas zonas se propaga por toda la extensión del océano Pacífico, llegando a las costas de Chile

como oleaje de fondo (swell). Debido a la cercanía con la zona de generación, el swell del SW domina durante todo el año, mientras que el swell del NW se manifiesta en verano con baja altura y largo periodo (Molina, 2011; OCEANOR, 2008; Acuña & Monárdez, 2007). Tanto el calentamiento global como el fenómeno ENOS inciden directamente sobre los patrones de circulación atmosférica (Garreaud & Falvey, 2008; Rutllant, 2004; Maturana *et al*, 2004) y, por lo tanto, alteran los mecanismos de generación de oleaje. Los patrones de circulación responden a gradientes de temperatura y presión en la atmósfera que son modificados por el aumento de la temperatura media del planeta asociada al cambio climático. El fenómeno ENOS, por su parte, genera una alteración de las corrientes cálidas ecuatorianas, modificando el desarrollo de la celda planetaria de Walker planetaria (Rutllant, 2004) y de esta forma alterando los vientos alisios.

Uno de los primeros efectos reconocibles del calentamiento global sobre las olas, es el aumento en la altura que estaría provocando; (NCCOE, 2004) pero sus efectos sobre el período y dirección son materia de estudio. Los efectos del fenómeno ENOS en el oleaje, en cambio, no han sido explorados aún en la literatura científica. En este trabajo se considera que el calentamiento global se asocia a cambios en las medidas de tendencia central (promedios) de series de tiempo de parámetros del oleaje, al igual que el fenómeno ENOS por las fluctuaciones cíclicas irregulares entre sus fases cálida y fría[§]

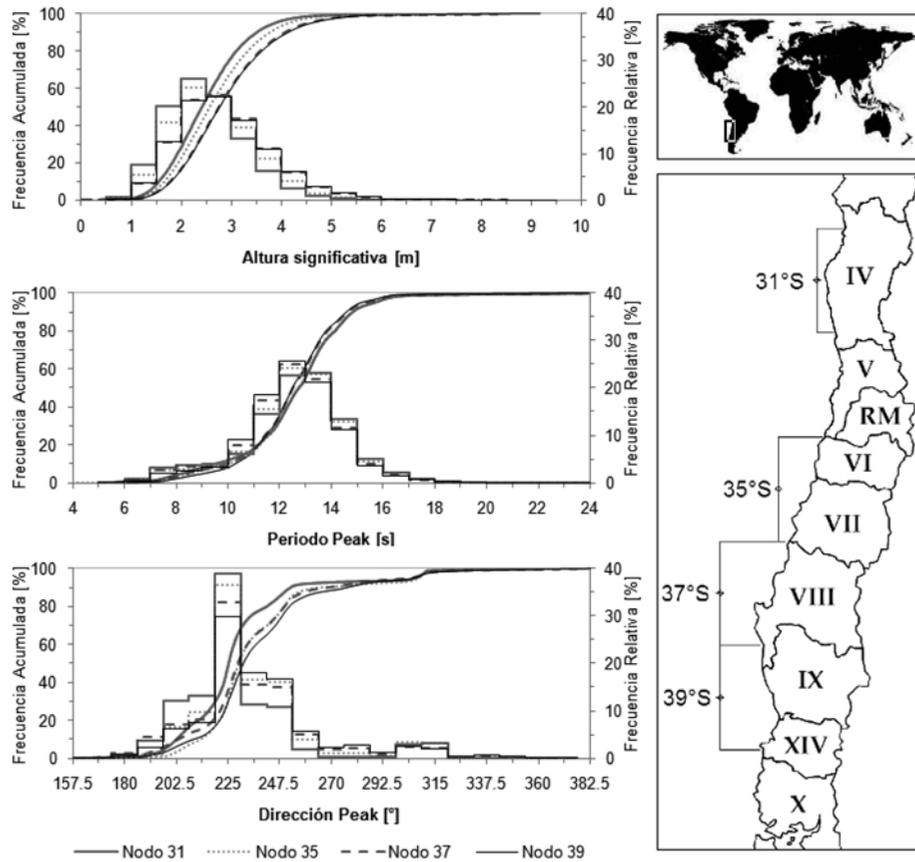
2. Datos Disponibles

2.1. Registros de oleaje

La estadística fue proporcionada por la empresa Fugro OCEANOR en el marco del proyecto “Estudio de evaluación del potencial de energía de oleaje entre las IV y X regiones, Chile”

[§] La fase cálida (El Niño) del ENOS está asociada a un aumento de la temperatura superficial del océano, disminución de los vientos alisios y severas precipitaciones. La fase fría (La Niña) se asocia a una disminución de la temperatura del océano, sequías e intensificación de los vientos alisios.

Figura 1. Emplazamiento de los nodos considerados (derecha) y Distribuciones de frecuencia que caracterizan las series de tiempo en estudio (doce en total)



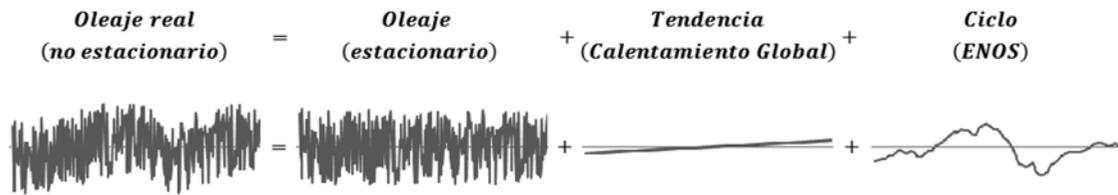
desarrollado por el Grupo de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso. Esta estadística fue obtenida del modelo de hindcasting WAM ejecutado por el Centro Europeo para el pronóstico del tiempo en el mediano plazo (ECMWF) y consiste en 20 años efectivos de oleaje espectral cuyos detalles son descritos en Molina (2011). La serie se extiende desde el 01/01/1985 hasta el 31/12/2006, presentando una discontinuidad entre el 31/05/1991 y el 01/06/1993. Los parámetros que presenta son Altura Significativa (H_s), Periodo Peak (T_p) y Dirección Peak (Dir_p) para el estado de mar completo, en los 4 nodos considerados (Figura 1):

- Nodo 31, ubicación 31°S 72°W.
- Nodo 35, ubicación 35°S 73°W.
- Nodo 37, ubicación 37°S 74.5°W.
- Nodo 39, ubicación 39°S 74.5°W.

2.2. Registros asociados al fenómeno ENOS

La estadística fue obtenida del sitio web de la National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA, 2010) y abarca de 1950 a 2010, eligiéndose para efectos de este estudio el índice SSTA Niño 3.4 en la misma ventana temporal que el oleaje. Esta serie se denomina de aquí en adelante ENOS 3.4.

Figura 2. Descripción del modelo aditivo: El oleaje real se supone como la suma de un ruido (oleaje estacionario), tendencia (efecto cambio climático) y variaciones cíclicas irregulares explicadas por el ENOS



2.3. Registros asociados al calentamiento global

Se utilizó la serie GLOTI, que consiste en los promedios mundiales mensuales de las estaciones de temperatura tierra-oceano, disponible en el sitio web de la National Aeronautics and Space Administration (NASA, 2010).

3. Metodología

Este análisis de series de tiempo descansa en el supuesto de un modelo aditivo entre las series de ENOS 3.4 o GLOTI con la señal de parámetros de oleaje, lo que supone independencia entre los fenómenos (Figura 2). Esto puede ser descrito mediante la expresión:

$$x_t = T_t + C_t + E_t$$

Donde:

- x_t corresponde a uno de los parámetros del oleaje real, considerado como no estacionario.
- T_t es la tendencia o cambios en el comportamiento principal de la serie, asociados al calentamiento global, explicados por GLOTI.
- C_t son las fluctuaciones cíclicas irregulares asociadas al fenómeno ENOS
- E_t corresponde a la parte estacionaria de la serie, incorporando el oleaje estacionario, los efectos de estacionalidad sobre el mismo y el ruido o errores de aproximación del modelo.

El supuesto de independencia entre el ENOS y el calentamiento global, permite separar ambos efectos y analizar de manera aislada las siguientes expresiones más simples:

- Primer Paso (Acción del calentamiento global sin considerar ENOS): $x_t = T_t + E_t$, lo que permite estimar una tendencia (\hat{T}_t), atribuible a los efectos del calentamiento global y que puede ser proyectada de acuerdo a los escenarios de cambio climático (IPCC, 2007).

- Segundo Paso (Análisis de los efectos del ENOS):

$$y_t = x_t - \hat{T}_t = (T_t - \hat{T}_t) + C_t + E_t = C_t + \tilde{E}_t$$

es decir a la serie de oleaje se le quita la variación asociada a la tendencia lineal por calentamiento global y se estudian los efectos del ENOS.

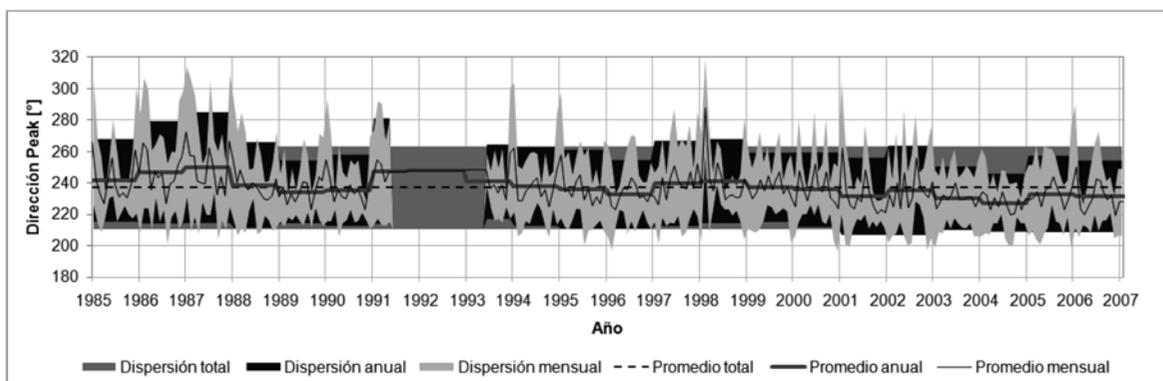
Para verificar la hipótesis de no-estacionariedad, se ajustó una tendencia lineal a las series de tiempo de cada parámetro y se calcularon los rangos de variación entre los extremos de los promedios y desviaciones estándar mensuales. Se seleccionaron aquellos parámetros y nodos que presentan variaciones importantes y, por lo tanto, evidencian variaciones no estacionarias.

Se analizó la relación entre las series de cada nodo y parámetro con los fenómenos considerados y se representó gráficamente para el nodo que presentó mayores variaciones no estacionarias con los índices ENOS 3.4 y GLOTI. Para facilitar esta comparación, se aplicaron promedios móviles triangulares simétricos como filtros pasa-bajo, aislando los efectos del comportamiento principal de las

Tabla I. Rango entre el inicio y término en la serie de tiempo mensual de la estadística para cada uno de los parámetros de oleaje por nodo. Valores diferentes de cero dan cuenta de cambios.

Latitud	Promedio Mensual			Desviación Estándar Mensual		
	H_s [m]	T_p [s]	Dir_p [°]	H_s [m]	T_p [s]	Dir_p [°]
31°S	0.13	0.18	-13.33	0.09	0.62	-5.48
35°S	0.09	0.18	-13.84	0.18	0.53	-6.09
37°S	0.07	0.44	-8.91	0.09	0.35	-5.41
39°S	0.11	0.37	-10.82	0.07	0.42	-5.15

Figura 3. Verificación del no cumplimiento del supuesto de estacionariedad de la serie de tiempo del parámetro de olas dirección peak (Dir_p) correspondiente al nodo 35°S



series, y no los efectos de escalas temporales intra-anales o ruidos. De esta manera se determinaron promedios mensuales de los parámetros de oleaje, a los cuales se ajustaron tendencias lineales anuales, para establecer coherencias con la serie que caracteriza el cambio climático por medio del calentamiento global (GLOTI). Asimismo, se detectaron anomalías en las series mensuales de los parámetros de oleaje, que fueron comparadas con la serie ENOS para verificar si esta última explica o no la presencia de tales anomalías.

A partir de la comparación visual de coherencia entre las series y los resultados obtenidos, se elaboró una tabla resumen que explica las relaciones causa-efecto entre los diversos fenómenos.

4. Resultados

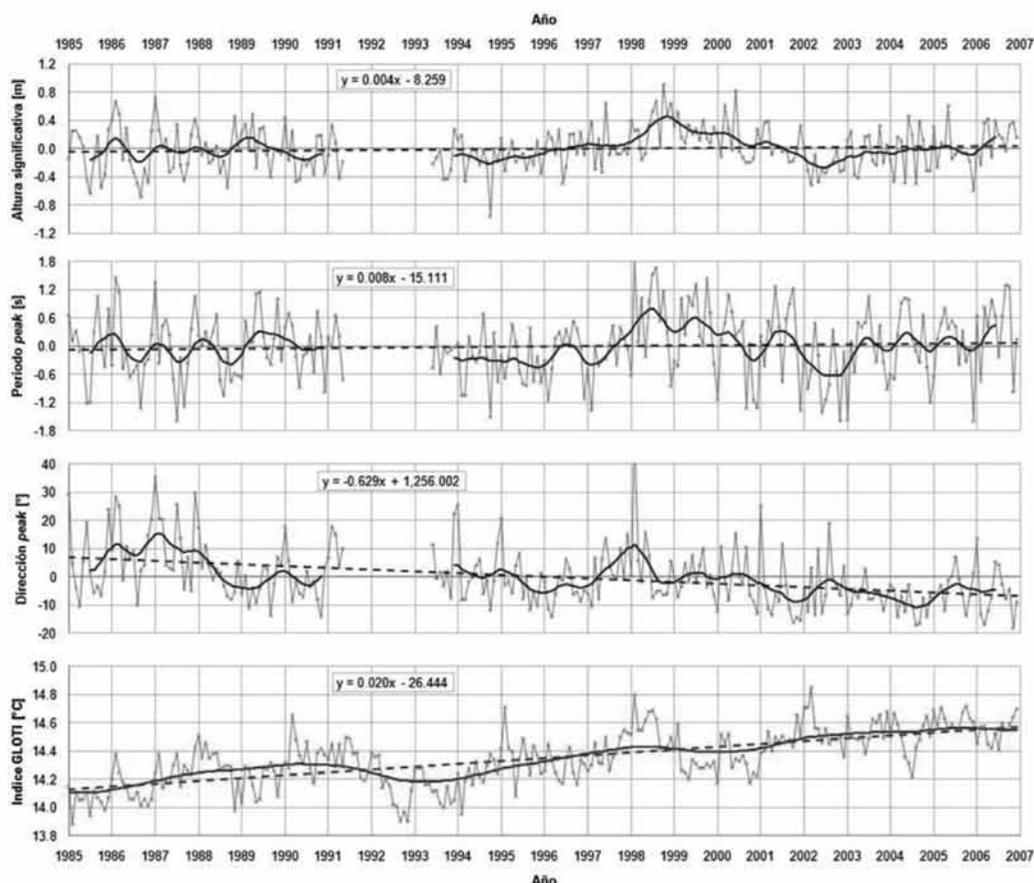
4.1 Verificación de la estacionariedad

El ajuste de la tendencia lineal a las series de tiempo de los parámetros altura significativa (H_s), periodo peak (T_p) y dirección peak (Dir_p) del oleaje, en cada uno de los 4 nodos

considerados, permitió calcular los rangos de variación entre los puntos inicial y final para promedios, como desviaciones estándar mensuales (Tabla I). Las máximas fluctuaciones y mayores características de no-estacionariedad se encuentran para la serie correspondiente a la dirección peak en el nodo 35, por lo que fue seleccionada para el análisis detallado.

Al evaluar los cambios en el tiempo para esta serie (Figura 3), se observa que el promedio y la desviación estándar son altamente variables en la ventana mensual, respecto de la serie completa, mientras que en la ventana anual las variaciones son menos abruptas, pero igualmente irregulares, respecto de la serie completa. Para ambos casos, los promedios mensual y anual se encuentran sobre el valor de la serie completa en la primera década, y bajo ésta, en la segunda década. De igual manera, en las desviaciones estándar mensual y anual se presenta una magnitud superior a la presentada para toda la serie en la primera mitad de la estadística, y una magnitud inferior en la segunda mitad. Esto constituye un indicador de que se trata de una serie no-estacionaria.

Figura 4. Comparación serie de promedio mensuales de parámetros altura, período y dirección de oleaje con el índice GLOTI de calentamiento global en el Nodo 35°S



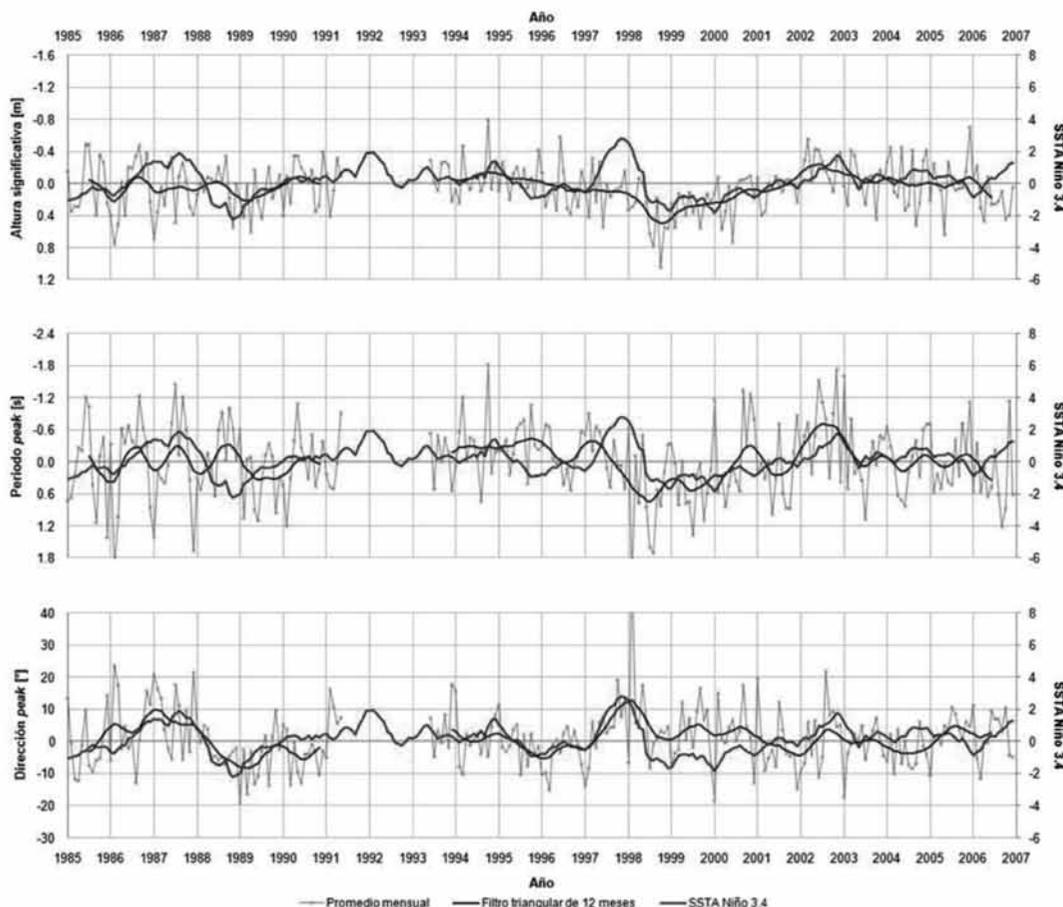
3.2 Variaciones en el oleaje influenciadas por el calentamiento global

De la comparación entre las series mensuales de los parámetros de oleaje y la serie del índice GLOTI, se obtienen variaciones anuales del promedio mensual por medio de una tendencia. Estos valores pueden presentar además la variación media experimentada por los promedios mensuales entre el comienzo y el término de la serie disponible (Tabla I). Se observa que el promedio mensual presenta un incremento en el desarrollo de la serie del orden de 10 [cm] en la altura significativa (H_s), mientras que en el período peak (T_p) hay aumentos en el orden de 0,30 [s]. Para la dirección peak (Dir_p), en cambio, se observan giros hacia el sur (disminuciones) en torno a los $11,73^\circ$.

En la figura 4 se destaca la presencia de una relación inversa entre las pendientes de las tendencias ajustadas al comportamiento

principal de las series GLOTI con la dirección peak en el nodo 35, obtenidas con los filtros triangulares. Lo anterior se puede interpretar como un cambio en el comportamiento del parámetro dirección del oleaje, en la medida que el planeta aumenta su temperatura por el calentamiento global, reflejado en la serie GLOTI.

Figura 5. Comparación serie de promedios mensuales por parámetro e índice SSTA Niño 3.4 (ENOS 3.4) en el nodo 35°S



4.3 Variaciones influenciadas por ENOS

En la figura 5 se muestra la comparación de coherencia entre las series de tiempo de los parámetros de oleaje considerados con el índice ENOS 3.4 en el nodo 35. Se aprecia la coordinación que existe entre el comportamiento del ENOS 3.4 con la dirección de oleaje. Por su parte, las series de altura y período de olas aparentan estar desfasadas con respecto a la transición entre la fase cálida y fría del ENOS y la mejor correlación – pero no significativamente diferente de cero – resulta ser negativa.

De la comparación de las anomalías mensuales de los parámetros de oleaje por latitud y la serie de ENOS (que, en sí, es una serie de anomalías de temperatura superficial del mar), se obtienen las relaciones entre cada uno de los parámetros de oleaje y el índice ENOS, en términos de las variaciones por unidad de índice y fase. Para

facilitar la interpretación, se presentan las variaciones asociadas a las condiciones más desfavorables (extremas) de ENOS, equivalentes a las marcas de clase 3.0 para un evento Niño severo y -2.5 para un evento Niña severa (Tabla II). Estos valores corresponden a los límites dentro de los cuales se presentó la totalidad de los valores de la serie completa del índice SSTA Niño 3.4, implicando esto las variaciones máximas esperables del oleaje, debido a este fenómeno.

Tabla II. Variación de los parámetros de oleaje por latitud esperados para fases extremas de ENOS.

Latitud	Niño Extremo (3.0)		
	Hs [m]	Tp [s]	Dirp [°]
31°S	0.22	0.41	17.43
35°S	0.23	0.28	18.00
37°S	0.20	0.03	9.95
39°S	0.17	0.07	9.44

Niña Extremo (-2.5)

Latitud	Hs [m]	Tp [s]	Dirp [°]
31°S	0.26	-0.64	-7.94
35°S	0.33	-0.74	-6.61
37°S	0.11	-0.52	-7.91
39°S	0.08	-0.50	-8.10

Bajo condición de Niño extremo (ENOS en fase calida) las variaciones se traducen en incrementos en torno a los 21 [cm] en la altura significativa (H_s), de 0,20 [s] en el período peak (T_p) y giro al norte de $13,71^\circ$ en la dirección peak (Dir_p). Bajo la condición de Niña extrema (fase fría), en cambio, las variaciones se presentan como incremento del orden de 20 [cm] en la altura significativa (H_s), disminuciones en torno a los 0,60 [s] para el período peak (T_p) y giros al sur en la dirección peak (Dir_p) del orden de $7,64^\circ$.

5. Discusión

5.1. Sobre los parámetros de oleaje

Los resultados muestran que la serie de Dirección Peak (Dir_p) en el nodo 35, tiene un comportamiento no estacionario (Figura 3); pues los valores asociados al promedio y desviación estándar mensual y anual distan de los valores obtenidos para la serie completa (en series estacionarias, las ventanas mensuales y anuales arrojan promedios y desviaciones estándar equivalentes). Del mismo modo, existe evidencia de que las otras series de tiempo de los parámetros que caracterizan el oleaje en los 4 nodos, también son no estacionarios (Tabla I). De esta forma, la verificación de que la dirección del oleaje en las costas de Chile, no es un parámetro estacionario coincide por lo establecido recientemente en Australia (Hemer *et al*, 2010) y España**.

** Nota de prensa en el El Mundo - España (21/05/2009): España puede perder 50 metros en la costa por cambios en el oleaje. Disponible en <http://www.elmundo.es/elmundo/2009/05/20/ciencia/1242836993.html> (noviembre 2011).

Tabla III. Influencia general latitudinal de los fenómenos en los promedios mensuales de los parámetros de oleaje

Fenómeno	H_s [m]	T_p [s]	Dir_p [°]
Calentamiento Global	↑	↑	↓
Niño	↑	↑	↑
Niña	↑	↓	↓

En la Tabla III se presenta un esquema de los efectos de los fenómenos de calentamiento global y ENOS (en fases Niño y Niña) en los parámetros del oleaje. En general, la altura de ola (H_s) presenta incrementos significativos en todos los nodos para cada caso. El período peak (T_p) muestra un incremento sustancial por calentamiento global, un incremento de menor magnitud en algunos nodos durante la fase Niño y disminuciones significativas en todos los nodos en la fase Niña. Para la dirección peak, (Dir_p) se presentan notorias disminuciones para los casos de calentamiento global y condición Niña, e incrementos durante la fase Niño, lo que significa que el efecto del calentamiento global y la fase fría del ENOS es modificar la dirección peak del oleaje, produciendo un giro hacia el sur; mientras que la fase cálida del ENOS, produce un giro hacia el norte.

Este resultado implica que es discutible determinar el clima de oleaje con un registro de 20 años de datos o base de datos espectrales bidimensionales de olas, obtenidas por un proceso de hindcasting (SHOA, 2011), sin considerar el calentamiento global, ni la presencia o ausencia del ENOS, para ser proyectado en el tiempo y utilizado con el fin de establecer los valores de diseño y operación de obras portuarias y costeras, como asimismo, para aspectos de operación de naves, seguridad, navegación y en lo relativo a su incidencia en los procesos de sedimentación y erosión (SHOA, 2011, *op. cit*).

5.2. Sobre el modelo aditivo

Este análisis de series de tiempo, basado en un modelo aditivo, supone independencia entre los fenómenos de cambio climático y ENOS. No obstante, existen evidencias de una fuerte dependencia del fenómeno ENOS y el calentamiento global (Yang & Zhang, 2008), lo que sugiere que el uso de un modelo aditivo puede ser demasiado simplista. Para efectos de la práctica de ingeniería, sin embargo, esta metodología que permite obtener las relaciones mostradas en la tabla III, es un paso adelante y debiera ser ampliada incorporando interacciones no lineales entre los fenómenos. De esta manera, se tendrían relaciones de los parámetros de oleaje con los efectos de:

- Calentamiento Global.
- Calentamiento Global y presencia de la fase cálida del ENOS.
- Calentamiento Global y presencia de la fase fría del ENOS.

5.3. Efecto del cambio climático en la configuración de las playas

Las playas son el resultado de los depósitos de material realizados por acción de las olas en zonas costeras de escasa energía (Dean & Dalrymple, 2004), dependiendo en gran medida de la posición relativa de la línea de costa con respecto a la dirección de incidencia del oleaje (Soto & Arriagada, 2007). El tipo de zona de rompiente, el tipo de sedimento, la energía de las olas, la amplitud de la marea y el efecto del viento determinará la forma de la playa (Dean & Dalrymple, 2004, *op. cit.*). Los modelos de evolución de playas buscan integrar todas estas dinámicas para pronosticar su evolución, en el supuesto de que la secuencia e intensidad de la variación de factores como mareas, vientos y olas, es conocida (Vidal *et al* 1995). Por esta razón, variaciones en la dirección del oleaje tienen implicancias en los equilibrios morfodinámicos de playas y fenómenos de transporte de sedimentos litorales, siendo un factor relevante en la erosión o acreción de las playas.

Una modificación de pocos grados en la dirección del oleaje puede significar consecuencias más severas que el alza del nivel de mar. El nivel medio del mar presenta incrementos del orden de milímetros por año, que pueden generar retrocesos de las playas, del orden de pocos metros en el horizonte de décadas. Las alteraciones en el patrón de oleaje, no obstante, podrían implicar retrocesos del orden de decenas de metros (Losada, S/F).

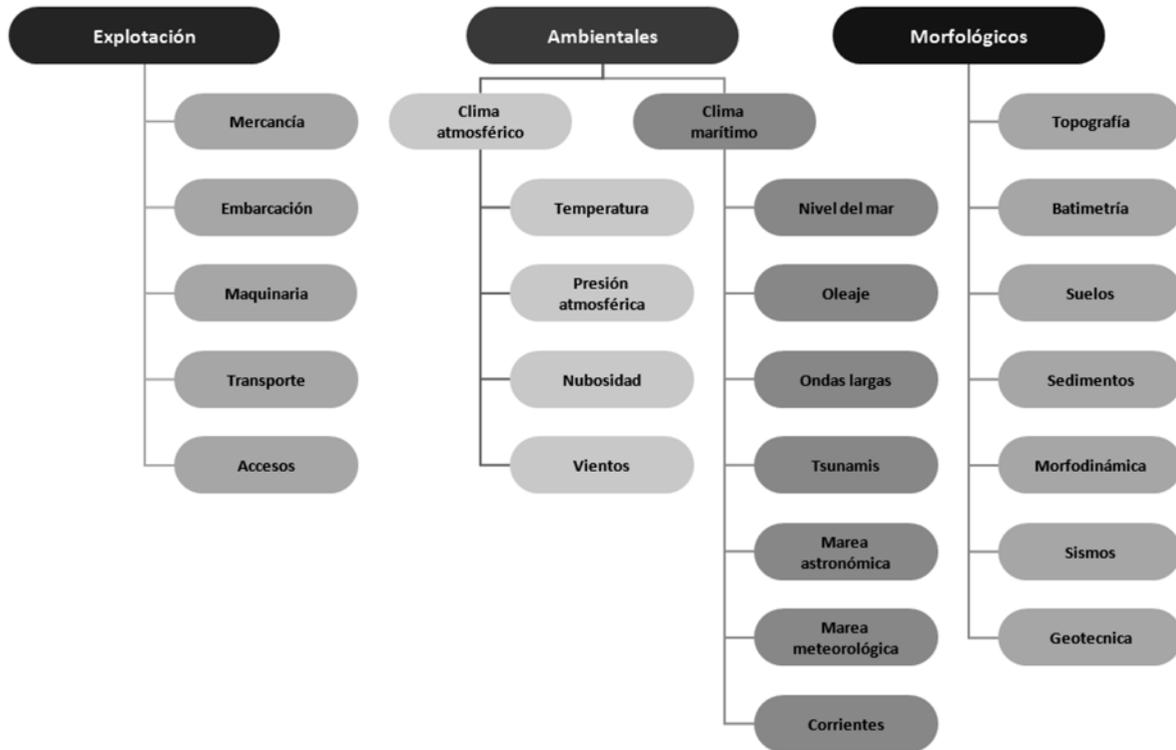
6. Conclusiones y Recomendaciones

Mediante el análisis de estadísticas de oleaje, calentamiento global y fenómeno ENOS, se constata que los principales parámetros utilizados en la caracterización del oleaje en las costas de Chile son de carácter no-estacionario. Las implicancias de este comportamiento sobre las obras marítimas pueden ser significativas, por lo que es recomendable que se considere una metodología no estacionaria en el proceso de diseño, incorporando las eventuales alteraciones del oleaje por efectos del cambio climático. El uso de los escenarios optimistas, conservadores y pesimistas propuestos por el IPCC (2007) en una metodología de diseño como la propuesta, puede constituir un buen avance de cara a la disminución del riesgo de fallo de las obras marítimas, pues las metodologías actuales pueden redundar en diseños poco conservadores, al no considerar estos efectos.

Es necesario abordar estudios más profundos de caracterización de clima de oleaje, que consideren el pronóstico de valores extremos, metodologías de análisis espectral, entre otros. Asimismo, es importante también extender el análisis a las costas del Norte y Sur del país.

El clima del oleaje, si bien principal, no es el único parámetro considerado en el diseño de obras de ingeniería marítima. Otros factores importantes son el viento, la temperatura, la presión atmosférica, las corrientes y la marea meteorológica, entre otros (Figura 6). Una metodología robusta debiera considerar estos factores como procesos no-estacionarios, e

Figura 6. Condicionantes de un proyecto de ingeniería marítima



incorporar escenarios futuros de cambio climático (medios o extremos) en la determinación de los valores de diseño durante la vida útil de las obras portuarias y costeras. Esta metodología se puede utilizar asimismo en otros aspectos complementarios como la operación de naves atracadas, la navegación y en los procesos de sedimentación y erosión costera.

Es importante observar que actualmente Chile no cuenta con registros permanentes de oleaje, lo que en la práctica significa que no se cuenta con datos de larga duración que permitan verificar en el futuro la magnitud de los cambios que sufran fenómenos como el oleaje. Por el contrario, se cuenta sólo con registros directos de corta duración que en la escala de los procesos de cambio climático son de escasa utilidad. Una red de medición de oleaje en aguas profundas y en los principales puertos del país, similar a la desarrollada en España^{††} sería

de gran utilidad para cuantificar los fenómenos de cambio global, diseñar obras marítimas y garantizar la seguridad en la navegación en las costas de Chile.

7. Agradecimientos

La estadística de oleaje utilizada en el desarrollo del presente trabajo ha sido facilitada gentilmente por la empresa HydroChile S.A. en el marco del convenio suscrito con la carrera de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso, Chile.

^{††} Red de tiempo real olas en aguas profundas y someras y otros parámetros disponible en línea en:

http://www.puertos.es/oceanografia_y_meteorologia/redes_de_medida/index.html (Noviembre, 2001).

8. Bibliografía

- Acuña H & P Monardez. 2007.** Evaluación del potencial de la energía del oleaje en Chile. XVII Congreso Chileno de Hidráulica. Disponible en (visita: noviembre 2011): http://www.sochid.cl/index.php?option=com_content&view=article&id=136:congreso200729&catid=39&Itemid=57. 16pp.
- CEPAL. 2009.** La economía del Cambio climático en Chile: Síntesis. Colección Documentos de Proyectos. Disponible en web (fecha de visita: noviembre de 2011): http://cambioglobal.uc.cl/index.php?option=com_content&view=article&id=82&lang=es&Itemid=62. 89pp.
- Dean R & R Dalrymple. 2004.** Coastal Processes with Engineering Applications. Cambridge University Press. 475pp.
- Fuenzalida H. 1983.** La Atmósfera Inconstante, Circulación general de la atmósfera. Fascículos para la comprensión de la ciencia, las humanidades y la tecnología, vol 47, Consejo de rectores de las universidades chilenas. 107pp.
- Garreaud R & M Falvey. 2008.** The coastal wind of western subtropical South America in future climate scenarios. *International Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.1716
- Hanson J, B Tracy, H Tolman & R Scott. 2006.** Pacific hindcast performance evaluation of three numerical wave models. JCOMM Technical Report No. 34 / WMO-TD. No. 1368. Disponible en web: <ftp://www.wmo.int/Documents/PublicWeb/amp/mmop/documents/JCOMM-TR/J-TR-34-9th-waves-workshop/Papers/Hanson.pdf> (fecha visita noviembre de 2011). 29pp.
- Hemer M, J Church & J Hunter. 2010.** Variability and trends in the directional wave climate of the Southern Hemisphere. *Int. J. Climatol.* 30: 475–491, DOI: 10.1002/joc.1900.
- IPCC. 2007.** Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, disponible en web (visita: marzo 2011): http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf. 104pp.
- Losada I. S/F.** El cambio climático en las zonas costeras; previsiones y estrategias de adaptación. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Documento electrónico Disponible en web: <http://www.rac.es/ficheros/doc/00397.pdf> (fecha de visita: noviembre de 2011). 4pp.
- Maturana J, M Bello & M Manley. 2004.** Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación Sur. El Niño-La Niña 1997-2000. Sus Efectos en Chile. CONA, Chile. Disponible en web <http://www.cona.cl/libroelnino/lenol.htm> (fecha visita: marzo 2011): 13 – 27.
- Molina M. 2011.** Estudio no estacionario de clima medio de oleaje en la costa central de Chile, Tesis para optar al título profesional de Ingeniero Civil Oceánico, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Valparaíso. Disponible en (visita noviembre 2011): <http://www.monografias.com/trabajos88/estudio-no-estacionario-clima-medio-oleaje-costa-central-chile/estudio-no-estacionario-clima-medio-oleaje-costa-central-chile.shtml>. 140pp.
- NASA. 2010.** GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP), National Aeronautics and Space Administration, disponible en web (fecha visita: marzo 2011): <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>.
- NCCOE. 2004.** Guidelines for Responding to the Effects of Climate Change in Coastal and Ocean Engineering. The National

- Committee on Coastal and Ocean Engineering, Engineers Australia. 58pp.
- NOAA. 2010.** Monthly atmospheric & SST indices, National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponible en web: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/> (fecha visita: marzo 2011)
- OCEANOR. 2008.** Calibration of Wave Spectra in Two Locations off the Chilean Coast. Informe de calibración presentado por Fugro OCEANOR a HydroChile S.A.. 25pp.
- Parzen E. 1999.** Stochastic Processes. Classics, in applied Mathematics, vol 24. 324pp.
- Rutllant J. 2004.** Aspectos de la circulación atmosférica de gran escala asociada al ciclo ENOS 1997 – 1999 y sus consecuencias en el régimen de precipitación en Chile central. El Niño-La Niña 1997-2000. Sus Efectos en Chile. CONA, Chile. Disponible en web (fecha visita: marzo 2011): <http://www.cona.cl/libroelnino/lenol.htm>. 61 – 76.
- SHOA. 2011.** Instrucciones Oceanográficas N°1: Especificaciones Técnicas para mediciones y análisis oceanográficos. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, Publicación 3201. Tercera Edición 2005. Última actualización digital: 4 de noviembre de 2011 al Capítulo III, apartado 3.1 "Estudio de Olas".
- Soto M & J Arriagada. 2007.** Características dinámicas de ensenadas estructurales de Chile central. Maitencillo-Cachagua y Papudo, Región de Valparaíso. Revista de Geografía Norte Grande, 38: 99-112. Disponible en (visita noviembre 2011): http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-34022007000200006&script=sci_arttext
- Vidal C, MA Losada, R Medina & I Losada. 1995.** Modelos morfodinámicos de playas. Ingeniería del Agua. Vol. 2 Num. Extraordinario (abril 1995): 65 – 74. Disponible en web (noviembre de 2011): <http://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/3718/1/article4.pdf>.
- Winckler P, M Contreras, M Molina, I Sepúlveda & G Barbet. 2009.** Efectos de Cambio Climático en las costas de Chile: Informe de recopilación y análisis preliminar de antecedentes. DOC-ICO 02-2009. Disponible en (noviembre 2011): www.ingenieriaoceanica.cl (Investigación – Documentos ICO). 141pp.
- Yang H & Q Zhang 2008.** Anatomizing the Ocean's Role in ENSO Changes Under Global Warming. American Meteorological Society DOI: 10.1175/2008JCLI2324.1. 17pp.
-